

# Valutare la vulnerabilità urbana ai cambiamenti climatici e alle isole di calore urbano

RICERCA E  
SPERIMENTAZIONE/  
RESEARCH AND  
EXPERIMENTATION

Giacomo Chiesa<sup>a</sup>, Massimo Palme<sup>b</sup>,

<sup>a</sup>Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

<sup>b</sup>Escuela de Arquitectura, Universidad Católica del Norte, Chile

giacomo.chiesa@polito.it  
mpalme@ucn.cl

**Abstract.** Viene presentata una metodologia per valutare le criticità locali e la resilienza ai cambiamenti climatici (CC) e al fenomeno dell'isola di calore urbano (UHI - Urban Heat Island). Nel paper si analizzano gli impatti previsti sulla domanda energetica locale dell'ambiente costruito a causa delle variazioni climatiche. Nello studio sono proposti degli indicatori relativi al clima per valutare un indice di vulnerabilità a CC e UHI in contesti edificati specifici. Inoltre, tali indicatori saranno applicati a un insieme di località nel Clima mediterraneo considerando diversi contesti locali per valutare la resilienza di un edificio residenziale tipo anche tramite l'ausilio di simulazioni energetico-dinamiche.

**Parole chiave:** isola di calore urbana, cambiamenti climatici, edifici resilienti, indicatori di resilienza climatica, vulnerabilità tecnologica e ambientale.

## Introduzione e obiettivi

I cambiamenti climatici (CC) e l'isola di calore urbano (UHI)

sono due fattori di rischio riconosciuti collegati agli impatti umani in grado di influenzare fortemente le prestazioni dell'ambiente costruito introducendo nuove caratteristiche di vulnerabilità (Chiesa, 2017; Santamouris, 2014; Matteoli e Pagani, 2010). Questi impatti possono modificare le prestazioni e l'efficienza dei sistemi tecnologici aumentando la domanda di energia e incidendo negativamente sulla qualità del comfort.

Il documento introduce un metodo per stimare la vulnerabilità locale (condizione site e hazard specific) a causa degli impatti negativi del cambiamento climatico e della UHI. Tale metodologia consente di comprendere e valutare possibili criticità e vulnerabilità per definire un approccio resiliente volto alla successiva definizione di strategie adattive. La procedura proposta, grazie alla sua semplice replicabilità, viene applicata per definire un protocollo volto a valutare l'entità locale dei rischi considerati.

Assessing climate change and urban heat island vulnerabilities in a built environment

**Abstract.** A methodology is presented to assess local criticalities and resilience to climate changes (CC) and UHI (Urban Heat Island). This analysis will consider the expected impacts on the local energy demand of the built environment due to climate-related variations. Climate-related indicators are proposed to assess a vulnerability index to CC and UHI in specific building-design contexts. Furthermore, these indicators will be applied to a set of locations in the Mediterranean climate while taking into consideration different local contexts to evaluate the resilience of a sample residential building by using, among other strategies, dynamic energy simulations.

**Keywords:** urban heat island, climate changes, resilient buildings, climate resilience indicators, technological and environmental vulnerabilities.

## Metodologia

L'entità locale dello stress climatico è valutata tramite l'implementazione degli scenari IPPC (rapporti V° e IV°) sui dati meteorologici tipici annuali (TMY) di una località. L'effetto UHI è valutato analizzando l'ambiente costruito a scala locale tramite una procedura in ambiente GIS (es. Palme et al, 2017) in grado di identificare i fattori di stress sui dati climatici locali (fase 1). Queste analisi sui due fattori di stress (hazard-specific), riferiti a diversi contesti locali (site-specific), saranno utilizzate per valutare la vulnerabilità di indici sintetici relativi alla domanda energetico-climatica (cfr. Chiesa e Grosso, 2015), volti all'identificazione di specifiche scelte progettuali, e per calibrarli in base a simulazioni energetiche dinamiche su un caso campione.

Per valutare la vulnerabilità ai cambiamenti climatici e alle isole di calore urbano di un ambiente costruito, sono introdotte due famiglie di indicatori, adattando un metodo sviluppato in una precedente ricerca (Chiesa e Grosso, 2015b). La prima serie fa riferimento a indicatori climatici (si veda Olgyay, 1963; Santamouris e Asimakopoulous, 1996) e include il calcolo degli indici locali di raffreddamento e riscaldamento – CDD (Cooling Degree Days) e HDD (Heating Degree Days) calcolati secondo la norma UNI EN ISO 15927-6:2008 – assumendo diverse temperature di riferimento - 20°C (DPR 412-93, allegato A) e 18.3°C (standard ASHRAE, Day et al 2006) per la stagione invernale; 26°C (Xuan e Ford, 2012; Chiesa, 2016), 22,5°C e 18,3°C (ASHRAE CDD65) per la stagione estiva – (passaggio 2). La seconda famiglia di indicatori include l'effetto dell'edificio, calcolando il fabbisogno energetico per il raffreddamento ( $Q_{cool}$ ) e il riscaldamento ( $Q_{heat}$ )

## Introduction & objectives

Climate changes (CC) and urban heat island (UHI) are two recognised factors of risk connected to human impacts which can greatly influence the performance of the built environment by introducing new vulnerability features (Chiesa, 2017; Santamouris, 2014; Matteoli and Pagani, 2010). These impacts may modify the performance and the efficiency of technological systems by increasing energy demand and stressing/downgrading comfort quality. The paper introduces a method which estimates local (site and hazard specific) vulnerability due to adverse climate-change and UHI impacts. This method allows us to understand and assess possible weaknesses and vulnerabilities in order to define a resilient approach and in order to act correctly on the built-up environment. Furthermore, the proposed procedure will be used, thanks

to its simple replicability, to define a protocol to test the expected local magnitude of the risks under consideration.

## The proposed methodology

The local magnitude of climate-change stress will be evaluated by implementing the IPPC scenarios (V° and IV° reports) on typical meteorological data, while the UHI effect will be evaluated by analysing the local built environment using a GIS-based procedure (e.g. Palme et al., 2017) which is able to identify the relative stress factors on local climate data (step 1). These analyses of the two stress factors (hazard-specific), referred to diverse specific contexts (site-specific), will be used to evaluate inducted variations in synthetic climate-demand related indexes (see Chiesa and Grosso, 2015), which affect both building design choices and existing buildings, and to further calibrate

[kWh/m<sup>2</sup> a] utilizzando simulazioni energetico-dinamiche tramite EnergyPlus effettuate su un caso di riferimento composto da un tipico appartamento residenziale seguendo un approccio introdotto in letteratura (Chiesa et al., 2017). Gli indicatori relativi all'edificio sono utilizzati per calibrare quelli relativi al clima al fine di sviluppare una metodologia per valutare la qualità e la resilienza dell'ambiente di costruzione. Inoltre, considerando l'appartamento tipo, gli indicatori sono adattati per analizzare la vulnerabilità al cambiamento climatico di diverse scelte tecnologiche (livelli di isolamento, schermatura solare, ventilazione naturale) (fase 3).

#### **Fase 1: generazione dei TMY modificati – Magnitudine locale dei rischi da UHI and CC**

Si introduce una metodologia di calcolo della magnitudine locale dei rischi connessi all'UHI e ai CC. Il metodo proposto utilizza due software: Urban Weather Generator (Bueno et al., 2012), per generare un file \*.epw modificato dall'impatto negativo dell'UHI, e Meteonorm per includere il fattore di stress climatico causato dai cambiamenti climatici futuri.

In particolare, l'Urban Weather Generator (UWG) è uno strumento di simulazione atmosfera-edificio che consente di stimare l'effetto "isola di calore urbana" e trasformare un file di dati meteorologici in un file di dati meteorologici "urbani". La generazione di condizioni meteorologiche urbane è condotta in UWG considerando l'influenza di molti parametri, quali per esempio le proprietà dei materiali (suoli, tetti, pareti), la forma urbana, la generazione di calore antropogenica (in strada e all'interno di edifici) e la presenza di aree verdi. Recenti studi di sensibilità (Nakano

et al., 2015; Palme et al., 2016; Salvati et al., 2016) hanno messo in evidenza che i parametri più importanti da valutare sono i tre parametri relativi alla forma urbana, le proprietà del materiale e il calore sensibile di natura antropogenica relativo alle strade. Il risultato della simulazione UWG è un file in formato \*.epw che utilizzabile nella simulazione EnergyPlus delle prestazioni degli edifici.

Meteonorm (v7.1.11) è uno strumento consolidato, la cui prima versione è stata pubblicata nel 1985, che consente di ottenere e gestire dati meteorologici da record storici (stazioni meteorologiche, interpolazioni o un mix di entrambi). Tale strumento è dotato di un'opzione per prevedere il clima futuro di una determinata località, utilizzando diversi scenari di cambiamento climatico. Nello specifico, si basa sull'applicazione degli scenari di cambiamento climatico IPCC (FAR, Meehl et al., 2007) ai TMY attuali al fine di ottenere un \*.epw modificato da utilizzare nelle simulazioni, considerando anomalie di temperature, precipitazioni e radiazioni globali (Meteotest, 2017). Per questo articolo viene adottato lo scenario di A1B - mix bilanciato di fonti energetiche in un contesto di sviluppo economico elevato.

In questa fase, si sono individuate 9 località di riferimento, rappresentative dei tipici climi mediterranei – Cs nella classificazione Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006) – considerando una latitudine tra 30° e 45° e la vicinanza al mare: Algeri (DZ); Atene (GRC); Barcellona (SPA); Beirut (LBN); Los Angeles (Stati Uniti); Roma (ITA); Città del Capo (ZAF); Perth (AUS); Valparaiso (CHL). Tali località rappresentano le principali caratteristiche morfologiche dei contesti urbani mediterranei, tuttavia, ulteriori studi sono in corso per incrementare tale

them according to dynamic energy simulations of a sample case.

In order to assess climate-change and urban-heat-island vulnerabilities in a built environment, two families of indicators are used by adapting a method developed in a previous research (Chiesa and Grosso, 2015b). The first family will refer to climate-based indicators (see also Olgyay, 1963; Santamouris and Asimakopoulou, 1996) and includes the calculation of local climate-cooling and heating indexes – CDD (Cooling Degree Days) and HDD (Heating Degree Days) calculated according to the UNI EN ISO 15927-6:2008 – assuming different reference base temperatures – 20°C (DPR 412-93, attachment A) and 18.3°C (ASHRAE Standard; Day et al., 2006) for winter; 26°C (Xuan and Ford, 2012; Chiesa, 2016), 22.5°C and 18.3°C (see ASHRAE CDD65) for

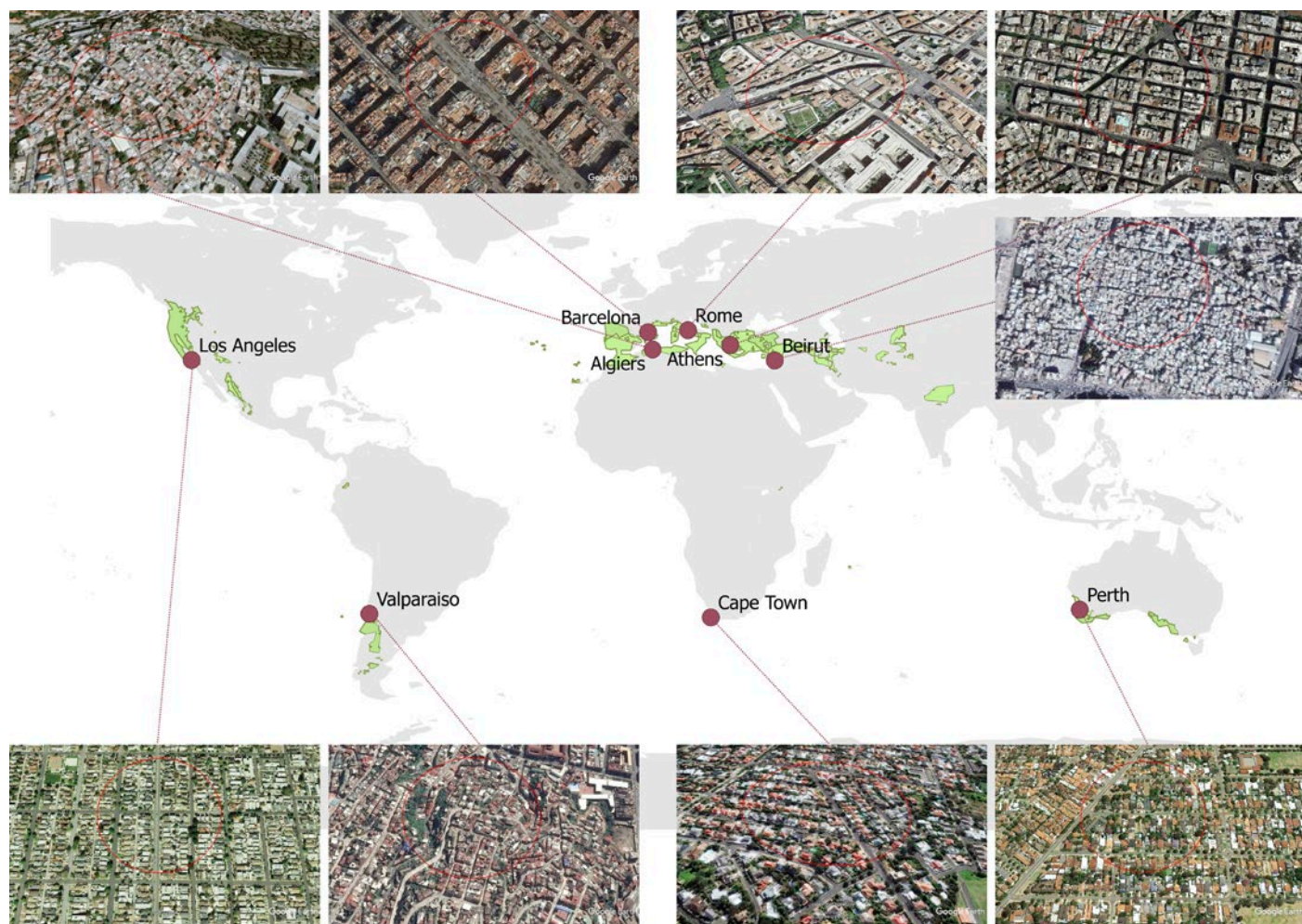
summer – (step 2). The second family of indicators will include the building effect, by calculating the energy requirement for cooling ( $Q_{cool}$ ) and heating ( $Q_{heat}$ ) [kWh/m<sup>2</sup> y] using energy dynamic simulations performed in EnergyPlus. In this paper a typical residential apartment is used as a sample in line with an approach already introduced in literature (Chiesa et al., 2017). The building-related indicators are used to calibrate the climate-related ones in order to develop a devoted set of requirements to evaluate the quality and the resilience of the built environment. Furthermore, indicators are adapted to analyse the vulnerability of different technological choices on the sample apartment (levels of insulation; external blinds; natural ventilation) in climate changing scenarios (step 3).

#### **Step 1: generation of modified-TMY databases – local magnitude of UHI and CC risks**

In order to calculate the effect of the local magnitude of UHI and CC risks, a methodology is here introduced. The proposed method uses two softwares: Urban Weather Generator (Bueno et al., 2012) for generating a \*.epw-modified file due to the UHI adverse impact, and Meteonorm to include the climate-stress factor due to future climate changes. These tools are described here below.

The Urban Weather Generator (UWG) is a coupled atmospheric-building simulation tool that allows us to estimate the urban heat island effect and to transform a "base" weather data file into an "urban" weather data file. The urban weather generation is conducted in UWG by considering the influence of many parameters, such as material

properties (soils, roofs, walls), the urban form, the anthropogenic heat generation in the street and inside buildings, the presence of green areas and so on. Sensitivity studies (Nakano et al., 2015; Palme et al., 2016; Salvati et al., 2017; Salvati, 2016) point out that the most important parameters to be assessed are the three urban-form related parameters, the material properties and the anthropogenic-sensitive heat produced directly in the street. The result of the UWG simulation is a file in \*.epw format that could be used in an EnergyPlus simulation of building performance. Meteonorm (v7.1.11) is a well-known tool, whose first version was published in 1985, that allows us to obtain and manage weather data from historical records (weather stations, interpolation, or a mix of both). This tool, also has an option which predicts future weather for a specific location, in dif-



Tab. I - I 10 parametri utilizzati per definire l'impatto locale e la magnitudine dell'isola di calore urbano  
The 10 chosen parameters used to define the local impact and magnitude of the UHI

	Algiers	Athens	Barcelona	Beirut	Los Angeles	Rome	Cape Town	Perth	Valparaiso
Built Area / Site (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.72	0.61	0.45	0.70	0.48	0.53	0.47	0.43	0.64
Height Average (m)	4.2	17.5	18.2	4.1	3.8	15.5	6.5	6.0	3.5
Façade / Site (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	1.33	4.41	2.62	1.20	0.82	2.34	0.88	0.96	1.24
Green Area / Site (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.06	0.04	0.12	0.04	0.18	0.25	0.22	0.30	0.28
Emissivity (road)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.98	0.95	0.98	0.98	0.95
Albedo (road)	0.22	0.08	0.08	0.22	0.03	0.08	0.05	0.05	0.11
Emissivity (walls)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.98	0.95	0.98	0.98	0.95
Albedo (walls)	0.63	0.48	0.56	0.61	0.42	0.56	0.45	0.58	0.58
Emissivity (roofs)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.20	0.95	0.95	0.95	0.20
Albedo (roofs)	0.67	0.52	0.45	0.58	0.42	0.45	0.45	0.42	0.42
Traffic Average (W/m <sup>2</sup> )	3	18	20	3	25	15	22	22	5

database di casi studio. Per tutte le località sono stati prodotti quattro Anni Meteorologici Tipici (TMY): 1 = TMY corrente; 2 = TMY adattato all'UHI; 3 = TMY adattato al CC (2050 A1B); 4 = TMY adattato al CC e UHI (2050 A1B). La Figura 1 mostra le località scelte e le aree utilizzate per calcolare l'effetto UHI. In particolare, per tale analisi, sono stati valutati 10 parametri utilizzando Archgis e Google Earth: le 6 proprietà ottiche di suolo, pareti e tetti (riflesso della radiazione solare ed emissività della radiazione infrarossa) e i 4 parametri di morfologia urbana (area edificata, rapporto di facciata, area verde e altezza media). Il calore antropogenico, principalmente prodotto dalle automobili, è stato stimato in funzione della magnitudo stradale all'interno della zona considerata. La tabella 1 riporta questi dati per ogni località.

L'area edificata o superficie coperta del sito è definita come (1):

$$site\ coverage = \frac{\sum A_{bldg}}{A_{site}}$$

Dove  $A_{bldg}$  è l'impronta a terra di ogni edificio e  $A_{site}$  è l'area totale dell'area;

La superficie di facciata, o l'indice facciata-sito, è calcolato come (2):

$$facade\ to\ site\ ratio = \frac{\sum Ph_{wtd}}{A_{site}}$$

dove P è il perimetro a terra di ogni edificio,  $h_{wtd}$  è l'altezza pesata di ogni edificio (in base all'ingombro) e  $A_{site}$  è l'area totale di sito; L'area verde, o di copertura degli alberi, è definita come (3):

$$tree\ coverage = \frac{A_{green}}{A_{site}}$$

dove  $A_{green}$  è l'area a terra coperta da alberi.

ferent climate change scenarios. In particular, this tool is based on the application of the IPCC climate change scenarios (FAR; Meehl et al., 2007) to current TMY in order to obtain a modified \*.epw to be used in simulations while considering anomalies in temperature, precipitation and global radiation (Mettest, 2017). For this paper the mid A1B scenario – balanced mix of energy sources in a high economic development context – is adopted. Nine reference locations were chosen to represent typical Mediterranean climates – Cs in the Köppen-Geiger classification (Kottek et al., 2006) – distributed around the World considering a latitude between 30° to 45° and the proximity to the sea: Algiers (DZ); Athens (GRC); Barcellona (SPA); Beirut (LBN); Los Angeles (USA); Rome (ITA); Cape Town (ZAF); Perth (AUS); Valparaiso (CHL). For all lo-

cations, four Typical Meteorological Years (TMY) were produced: 1=current TMY; 2=UHI-morphed TMY; 3=CC-morphed TMY (2050 A1B); 4=CC&UHI-morphed TMY (2050 A1B). Those locations are able to represent the main urban morphologies of Mediterranean cities; nevertheless, further studies are under development to enlarge this database.

Figure 1 illustrates the areas chosen in the locations used to calculate the UHI effect. In particular, 10 parameters were assessed by using Archgis and Google Earth: the 6 optical properties of soils, walls and roofs (reflection of near solar radiation and the emissivity of infrared radiation) and the four urban morphology parameters (built-up area, façade ratio, green area and average height). Anthropogenic heat, principally produced by cars, was estimated based on road magnitude inside of the

## Fase 2: valutazione degli indicatori geo-climatici (edificio virtuale)

Dopo il calcolo dei TMY per diversi fattori di alterazione, è possibile definire una serie di indicatori per analizzare l'impatto dei CC e UHI prima della definizione di un edificio reale, facendo riferimento alle variabili climatiche. Questo approccio, basato sull'impatto "virtuale" di un edificio e utilizzabile sia per il metaprogetto, sia per le fasi successive, anche operative, può valutare gli impatti attesi legati allo stress sull'ambiente costruito. All'interno di questa tipologia di indicatori (vedi Chiesa e Grosso, 2015), si considerano per questo articolo l'HDD (Gradi Giorno di riscaldamento) e il CDD (Gradi Giorno di raffrescamento). Questi indicatori climatici sono direttamente correlati con la domanda di energia prevista dell'edificio, come sottolineato dall'utilizzo dell'HDD per la classificazione in zone climatiche del territorio italiano e per la definizione dei limiti di consumo e di altri valori (es. Trasmissioni massime). Inoltre, si è dimostrato come il CDD sia un parametro efficace per definire indirettamente la domanda locale di raffrescamento energetico degli edifici (Santamouris e Asimakopoulous, 1996; Chiesa et al., 2017). Al punto "discussione", questo parametro è convalidato sulle simulazioni definendo la temperatura di base ottimale per analizzare l'entità della vulnerabilità / resilienza della domanda di energia degli edifici sotto i fattori di stress CC e UHI.

La Figura 2 confronta l'HDD e il CDD per tutte le posizioni considerando i quattro TMY e impostando la temperatura di base di riferimento a 18,3°C. Come sottolineato dal grafico, l'UHI aumenta leggermente i valori di CDD, incrementando la vulnerabilità del raffreddamento, ma riduce significativamente l'HDD aumentando la resilienza nel periodo invernale. Tale ef-

considered zone. Table 1 reports these data for each location.

The built-up area or site coverage was defined by equation (1):

$$site\ coverage = \frac{\sum A_{bldg}}{A_{site}}$$

Where  $A_{bldg}$  is the footprint of each building in the site and  $A_{site}$  is the total site area;

The facade surface or façade to site ratio was defined by equation (2):

$$facade\ to\ site\ ratio = \frac{\sum Ph_{wtd}}{A_{site}}$$

Where P is the perimeter of each building in the site,  $h_{wtd}$  is the weighted building height (by footprint) and  $A_{site}$  is the total site area;

The green area or tree coverage was defined by equation (3):

$$tree\ coverage = \frac{A_{green}}{A_{site}}$$

Where  $A_{green}$  is the area covered by trees and  $A_{site}$  is the total site area.

## Step 2: assessment of geo-climatic indicators (virtual building)

After the calculation of TMYs under different alteration conditions, it is possible to define a series of indicators to analyse the impact of CC and UHI before the full-design of a real building with reference to climate-related issues. This approach, which is based on a "virtual" building impact and can be used for both meta-design (e.g. building programming), and further phases, including the operational one, can evaluate the expected stress-related impacts on the built environment. From this selection of indicators (see Chiesa and Grosso, 2015) the HDD and CDD are considered for this paper. These climatic indicators are directly related to expected building energy demand as underlined by the use of the HDD in the definition of Italian climate zoning for U-value and energy-needs bound-



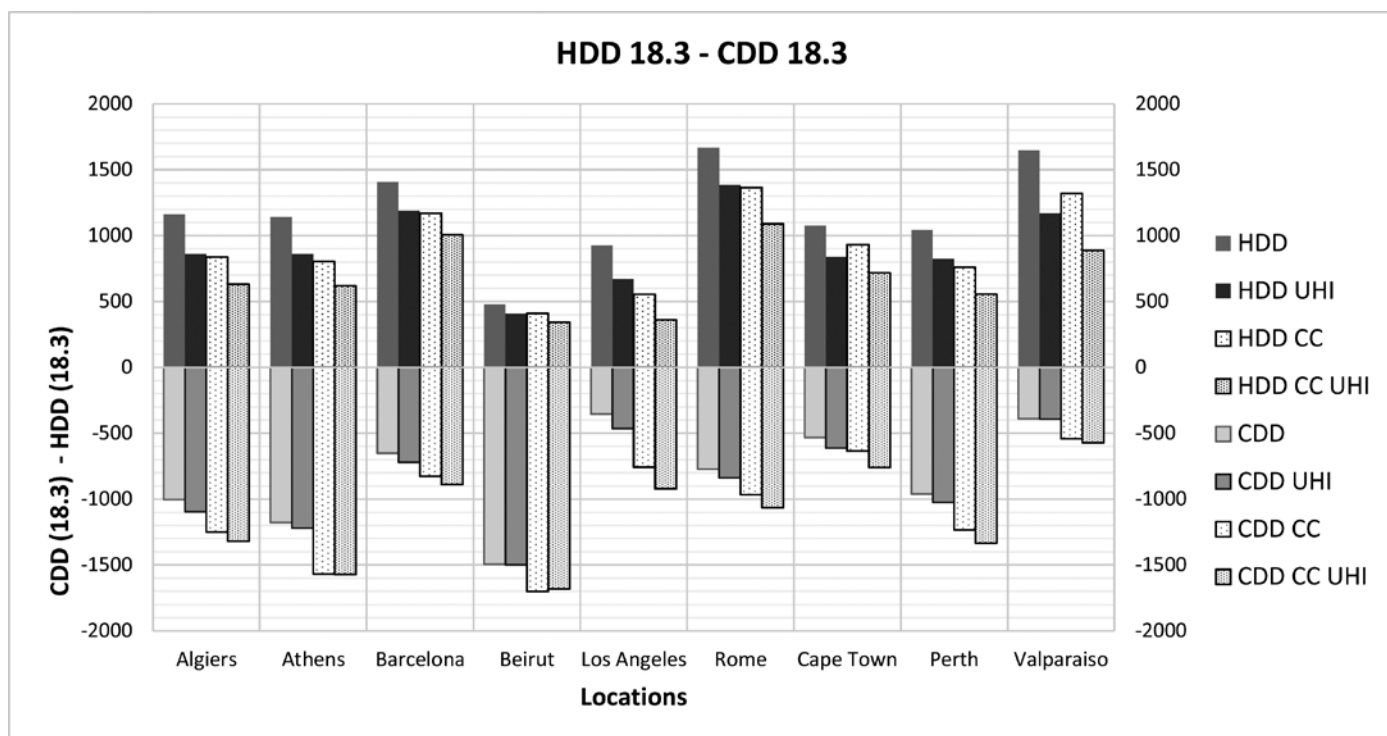
fetto, tuttavia, è meno visibile nel periodo estivo per le zone calde nel bacino del Mediterraneo (ad esempio Atene e Beirut). Una tendenza simile è evidente per il caso CC, per quanto l'aumento di tale indicatore sia notevolmente più alto in tutti i casi. Le variazioni previste di HDD e CDD consentono di definire l'entità dello stress da CC e UHI.

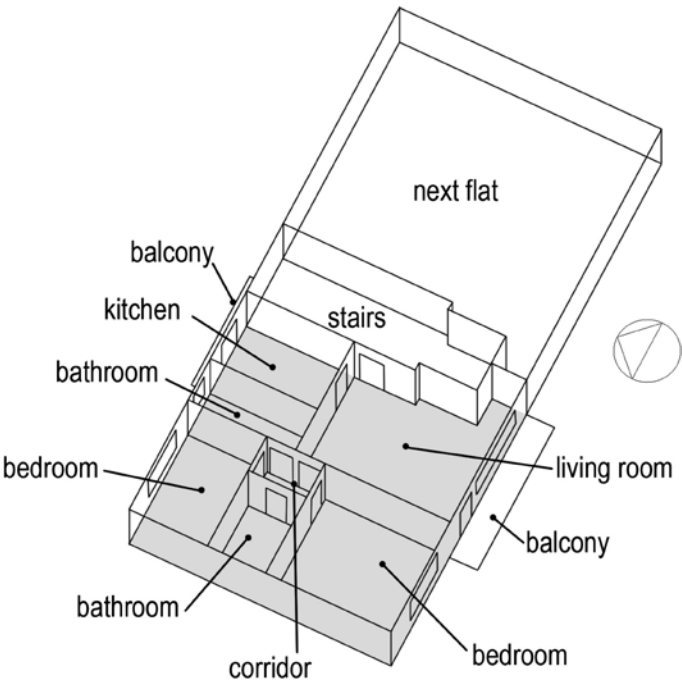
### Fase 3: valutazione degli indicatori di consumo di energia (sim. energetico-dinamiche)

Un alloggio residenziale tipo è stato simulato in EnergyPlus utilizzando l'interfaccia DesignBuilder. Il caso studio scelto è costituito da un appartamento di 74 m<sup>2</sup> localizzato in un piano intermedio in un edificio multipiano. L'organizzazione interna segue uno schema tipico (si vedano gli esempi sui manuali di architettura) ed è composta da un soggiorno, due camere da letto, due bagni e una cucina. Sono inclusi anche due balconi, uno rivolto a sud e uno rivolto a nord. Il piano simulato comprende l'alloggio di riferimento, uno spazio di distribuzione per scale e un secondo alloggio – Figura 3. Sono state simulate tre configurazioni di involucro per studiare l'effetto di diversi livelli di isolamento e per ognuna si sono anche simulati l'effetto di tende esterne e l'uso della ventilazione naturale. La Tabella 2 illustra i principali parametri utilizzati per le simulazioni, mentre i profili di utenza sono stati impostati da fonte Ashrae-Fundamen-

tals per la funzione principale di ogni stanza. Il setpoint di riscaldamento è stato fissato a 20 °C e quello di raffreddamento a 26 °C con un setback di 28 °C. Per ogni località sono state eseguite 9 simulazioni combinando i casi della Tabella 2 per ogni TMY (1 = 90-00 TMY; 2 = 90-00 TMY UHI; 3 = 2050A1B TMY; 4 = 2050A1B UHI TMY) per un totale di 324 analisi. I risultati principali delle simulazioni sono gli indicatori di fabbisogno di energia sensibile di riscaldamento e raffreddamento. Questi valori e le loro variazioni rappresentano un buon indicatore della magnitudine dello dei fattori di stress e della vulnerabilità del caso studio.

Considerando le caratteristiche del clima mediterraneo, l'analisi si focalizza sui comportamenti estivi. La Figura 4 illustra i valori di  $Q_{cool}$  nei casi Aa (Fig. 4.a) e Ca (Fig. 4.b) sul  $Q_{cool}$  rispetto ai corrispondenti valori per i casi Ab & Ac e Cb & Cc per tutti i TMY considerati. Questi grafici dimostrano che l'UHI e i CC hanno solo una leggera influenza sulle regressioni tra le diverse scelte tecnologiche, anche se influenzano fortemente i bisogni energetici che aumentano in tutti i casi. Tale considerazione permette di relazionare gli effetti di CC e UHI con una criticità nel consumo energetico sensibile dell'edificio che può ridurre considerevolmente l'impatto previsto di una scelta tecnologica nel garantire la qualità del comfort. Ciò suggerisce che gli approcci tecnologici adattativi debbano riferirsi a una condizione (hazard e site specific) in cui le esigenze di raffreddamento siano più elevate





di quelle attuali modificando il quadro di progetto tecnologico-esigenziale. La Tabella 3 riporta la percentuale di variazione della domanda di energia di raffreddamento [kWh/m<sup>2</sup> a] dovuta ai CC e all'UHI per ciascuna località rispetto al valore corrispondente dell'attuale TMY. Comportamenti diversi corrispondono a un valore di resilienza diverso del clima locale rispetto a UHI e CC. Nelle località in cui si evince una maggiore criticità, es. Los Angeles (clima più secco), sono necessarie contromisure tecnologiche specifiche, mentre le prestazioni delle attuali scelte tecnologiche devono essere verificate nelle future condizioni climatiche al fine di controbilanciare l'aumento significativo della domanda di raffreddamento e garantire il comfort interno. Naturalmente, l'aumento della  $Q_{cool}$  avrà un impatto anche sulla quantità di energia consumata dalle città, influenzando i costi energetici e la domanda di nuove centrali (soprattutto per la produzione di elettricità) e aumentando il rischio di blackout (Santamouris, 2007).

Tab. 2 - I parametri fondamentali impiegati per la simulazione  
Main parameters used in the simulations

Case Labelling	Envelope parameters	sub-case labelling	Technological parameters
A	U-value wall (no insulation) = 1.589 W/m <sup>2</sup> K U-value window (Sgl Clr 6mm) = 6.121 W/m <sup>2</sup> K	a	No shading devices and no controlled natural ventilation are used
B	U-value wall (10 cm insulation) = 0.287 W/m <sup>2</sup> K U-value window (Dbl LoE arg) = 1.499 W/m <sup>2</sup> K	b	External blinds with high reflectivity slats. Controlled on solar energy on the window (> 120 W/m <sup>2</sup> ) and external air temperature (> 24°C). No controlled natural ventilation
C	U-value wall (30 cm insulation) = 0.109 W/m <sup>2</sup> K U-value window (Tpl LoEe arg) = 0.789 W/m <sup>2</sup> K	c	No shading devices. Controlled natural ventilation by zone, till 7 ACH on summer season. Controlled by external air temperature (max = 26°C; min = 18°C). Window openings as vasistas (5% of tot. area)

ary requirements. Furthermore, the CDD was demonstrated to be an effective parameter to indirectly define the local energy cooling demand of buildings (Santamouris and Asimakopoulous, 1996; Chiesa et al., 2017). In a further section, this parameter is validated on simulations by defining the best base temperature to analyse the magnitude of vulnerability/resilience of building energy demand under CC and UHI stresses. Figure 2 compares the HDD and CDD for all locations while considering the four TMYs and setting the reference base temperature to 18.3°C. As is underlined by the graph, UHI slightly increases the CDD, with an expected rise of the cooling vulnerability, but significantly reduces the HDD by increasing resilience in the winter period thanks to a reduction in the expected energy heating demand. A similar trend is also

described for CC, even if the increase in the sensible cooling energy demand is quite evident in all cases. Nevertheless, for hot locations in the Mediterranean basin (e.g. Athens and Beirut) the effect of UHI is less visible in the cooling season. The expected variations of the HDD and CDD allow us to define the stress magnitude of CC and UHI.

**Step 3: assessment of energy-consumption indicators (dyn. simulated building)**

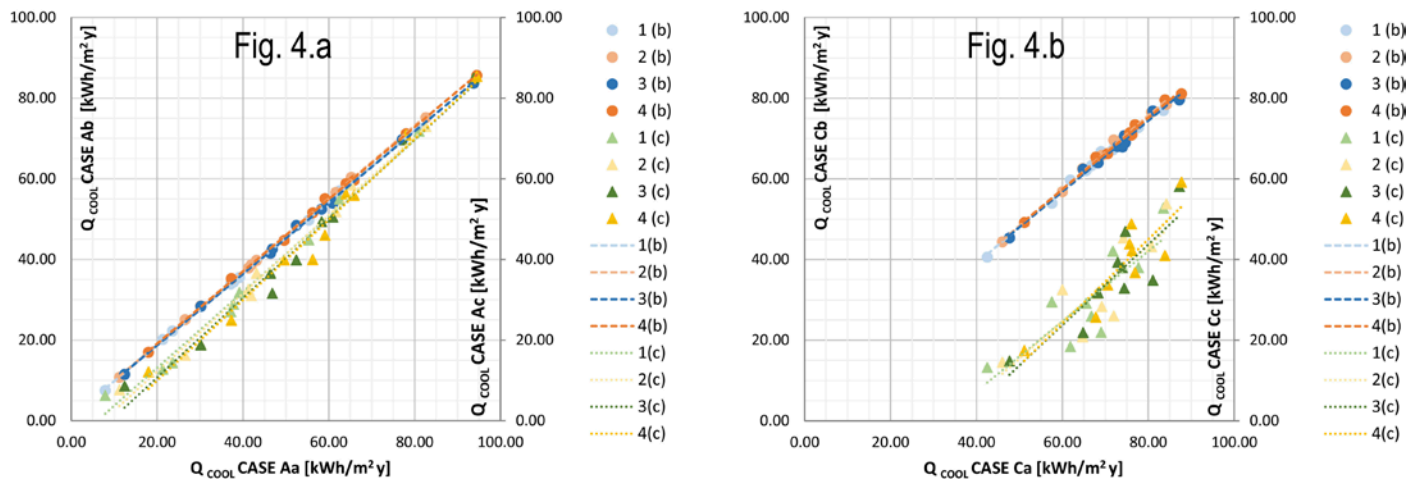
A sample residential flat unit was simulated in EnergyPlus by using the interface DesignBuilder. The chosen case study is a 74 m<sup>2</sup> flat localized on an intermediate floor in a multi-storey 2-flat-per-floor building. The internal layout of the flat is standard (see sample architect manuals): a living room, two bedrooms, two bathrooms, and a kitchen. There are also two balconies,

one facing south and one facing north. The sample floor includes the reference flat, a stair-elevator distributional space, and a second flat – see figure 3. Three envelope configurations were simulated to check the effect of different levels of insulation, while the effect of external blinds and natural ventilation was also simulated for each location and each insulation case. Table 2 illustrates the main parameters used for the simulations, while the occupational schedule was set as the Ashrae-fundamental-reference for each room's main usage. The heating set point was fixed to 20°C, and the cooling one to 26°C with a set-back of 28°C. For each location 9 simulations were performed combining the cases of table 2 for each TMY (1= 90-00 TMY; 2= 90-00 TMY UHI; 3= 2050A1B TMY; 4= 2050A1B UHI TMY) for a total of 324 analyses. The main results from the simulations

are the sensible heating and cooling energy demands of the sample flat. These values and their variations represent a good indicator of the stress magnitude on building performance. Given Mediterranean climatic characteristics, the main results focus on the summer. Figure 4 plots the  $Q_{cool}$  in cases Aa (Fig. 4.a) and Ca (Fig. 4.b) on the  $Q_{cool}$  respectively for cases Ab&Ac and Cb&Cc for all considered TMYs. These graphs demonstrate that UHI and CC will only slightly affect the linear regression between different cases, but they greatly influence energy needs that rise in all cases. This suggests that adaptive technological approaches may refer to a condition (hazard and site specific) in which cooling demands are higher than at present, thus opening up the possibility of changing the technological design framework. Further analysis focuses on the study of these

04 | Confronto tra il fabbisogno sensibile di raffreddamento nel caso Aa rispetto ai casi Ab e Ac (Fig.4.a); e del caso Ca rispetto ai casi Cb e Cc (Fig. 4.b) per ogni località e per i diversi TMY (casi 1-4)

Comparisons of the sensible cooling of case Aa Vs cases Ab and Ac (Fig. 4.a); and of case Ca Vs cases Cb and Cc (Fig. 4.b) for all locations and different TMYs (cases 1 to 4)



Tab. 3 - Percentuale di variazione dalla simulazione corrispondente nel caso di TMY attuale (caso 1) considerando diversi valori di isolamento (A, B, C) senza (caso a) o con (caso c) l'impiego della ventilazione naturale controllata

Percentage of variation from the correspondent simulation case of TMY condition 1 (current values), considering different levels of insulation (A,B,C) without (case a) or with (case c) controlled natural ventilation

	Sim. Case	Algiers	Athens	Barcelona	Beirut	Los Angeles	Roma	Cape Town	Perth	Valparaiso
UHI	A2a	11%	4%	9%	2%	28%	10%	24%	13%	42%
	B2a	7%	5%	6%	1%	7%	6%	8%	6%	15%
	C2a	4%	3%	4%	1%	4%	4%	5%	4%	8%
	A2c	16%	6%	13%	2%	32%	15%	27%	15%	23%
	B2c	14%	8%	9%	2%	19%	10%	15%	10%	13%
	C2c	14%	8%	8%	2%	19%	10%	13%	9%	10%
Vulnerability		Low	VLow	Low	VLow	Medium	Low	Medium	Low	High
CC	A3a	10%	23%	23%	16%	99%	49%	42%	41%	57%
	B3a	-2%	9%	8%	7%	27%	33%	8%	18%	21%
	C3a	-5%	4%	4%	4%	17%	27%	5%	11%	12%
	A3c	13%	27%	27%	18%	119%	55%	47%	47%	37%
	B3c	2%	14%	11%	11%	62%	36%	21%	29%	16%
	C3c	0%	12%	9%	10%	59%	33%	19%	27%	12%
Vulnerability		Low	Medium	Medium	Medium	VHigh	High	High	High	High
CC + UHI	A4a	19%	25%	31%	17%	139%	63%	75%	59%	127%
	B4a	2%	12%	14%	8%	35%	41%	17%	24%	37%
	C4a	-2%	6%	8%	5%	22%	32%	10%	15%	20%
	A4c	25%	29%	38%	19%	178%	77%	95%	70%	94%
	B4c	13%	18%	19%	13%	91%	52%	43%	44%	40%
	C4c	11%	16%	16%	12%	87%	49%	40%	41%	32%
Vulnerability		Medium	Medium	High	Medium	VHigh	High	VHigh	High	VHigh

conditions. Table 3 shows the percentage of variation in the cooling energy demand [kWh/m² y] for each location when CC and UHI risks are considered with respect to the corresponding value in the base TMY (case 1). Different be-

haviours correspond to a difference in local climate resilience to UHI and CC. Where high increases are underlined, e.g. Los Angeles (drier climate), specific technological counteractions are needed, while current technological choices

have to be checked for performances in future TMY conditions in order to counterbalance the significant rise in cooling demand and to guarantee indoor comfort. Of course, the increase in cooling demand will also impact on

the amount of energy consumed by cities and influence energy costs and the demand for new power plants (especially for electricity production), thus increasing the risk of blackouts (Santamouris, 2007).

## Discussione

L'indice climatico CDD è stato confrontato con la domanda di raffreddamento [kWh/m<sup>2</sup> a] calcolata dalle simulazioni per supportare e calibrare tale parametro. Una relazione diretta tra la domanda di raffreddamento climatico-virtuale e la  $Q_{cool}$  dell'appartamento tipo è evidente per ogni caso, specialmente quando la temperatura di base è impostata a 18,3°C - Figura 5 (a). Questo risultato conferma la validità dell'indicatore  $CDD_{18.3}$  come metodo per definire l'entità dei rischi CC e UHI sulla domanda di raffreddamento prevista degli edifici. Tuttavia, per temperature di riferimento differenti, le  $R^2$  ottenute dalla relazione CDD- $Q_{cool}$  sono inferiori ( $R^2 = 0,60$  per il caso A4a 26°C, 0,80 per 22,5 °C) o scarsamente significative (0,3 per B4a a 26°C, 0,48 a 22,5°C; 0,24 per C4a a 26°C, 0,4 a 22,5°C). Inoltre, la stessa figura suggerisce che la temperatura di base può essere ulteriormente ridotta quando si considerano alti valori di isolamento, assumendola intorno a 10°C come nel caso CDD50 definito da ASHRAE. Inoltre, come già sottolineato dalla Figura 4, la Figura 5 (b) mostra che lo stress da CC influenza solo leggermente la legge di regressione, ma, modificando significativamente i consumi e il CDD, cambia il quadro (punto cartesiano) in cui vengono valutate le scelte tecnologiche. Ad esempio, superando in modo climatico il punto di equilibrio in cui i livelli di isolamento alti (B) o molto alti (C) associati alla ventilazione naturale sono più efficienti dei bassi valori di isolamento (A).

## Conclusioni

La ricerca proposta introduce e calibra due serie di indicatori in grado di rappresentare la vulnerabilità locale agli stress climatici (UHI e CC) considerando sia un approccio "virtuale" al compar-

to edilizio, sia un approccio "reale" (simulazioni dinamiche). Le differenze nei gradi giorno di riscaldamento e raffreddamento locali dovute alle condizioni di CC e UHI possono essere analizzate utilizzando la metodologia proposta per valutare la qualità e la resilienza di un processo di progettazione sostenibile per edifici nuovi o interventi di retrofitting energetico sotto i rischi di variazione climatica nei contesti climatici mediterranei. I risultati sottolineano come l'indice CDD possa essere utilizzato in un protocollo per valutare lo stress atteso sui consumi energetici degli edifici e possa essere correlato all'effetto delle diverse scelte tecnologiche. Tuttavia, ulteriori analisi sono in fase di sviluppo per implementare altri parametri legati al clima e per analizzare l'effetto di un più ampio insieme di scelte tecnologiche in condizioni di CC e UHI in un insieme più vasto di località e tipologie edilizie.

La ricerca è stata co-finanziata dal fondo 59\_ATEN\_RSG16CHG (Italia) e dal fondo FONDECYT 11140578 (Cile).

## REFERENCES

- Bueno, B., Norford, L.K., Hidalgo, J. and Pigeon, G. (2012), "The urban weather generator", *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 6, No. 4, pp. 269-281.
- Chiesa, G. (2017), "Evaluating Early Design Choices under the Potential Effects of Climate Change", *SMC*, No. 6, pp. 24-28.
- Chiesa, G. (2016), "Geo-climatic applicability of evaporative and ventilative cooling in China", *International Journal of Ventilation*, Vol. 15, No. 3-4, pp. 205-219.
- Chiesa, G. and Grosso, M. (2015), "Geo-climatic applicability of natural ventilative cooling in the Mediterranean area", *Energy and Buildings*, Vol. 107, pp. 376-391.

## Discussion

The climate-related parameter CDD was compared to the cooling demand [kWh/ m<sup>2</sup> y] calculated by simulations to support and calibrate this indicator. A direct relation is underlined between the climate-virtual cooling demand and the energy demand of the sample flats for each case, especially when the base temperature is set to 18.3 °C – see for example Figure 5a. This result validates the  $CDD_{18.3}$  indicator as a method to define the magnitude of the CC and UHI risks to the expected cooling demand of buildings. Nevertheless, if different set temperatures are considered, the obtained  $R^2$  of CDD- $Q_{cool}$  relation are lower ( $R^2=0.60$  for case A4a 26°C; 0.8 for 22.5°C) or even not significant (0.3 for B4a at 26°C; 0.48 at 22.5°C; 0.24 for C4a at 26°C; 0.4 at 22.5°C). Furthermore, the same figure suggests that the base temperature may

even be reduced when high insulation values are considered, as much as 10°C as in the CDD50 defined by ASHRAE. Furthermore, as already underlined by Figure 4, Figure 5b shows that the CC stress will influence only slightly the regression law, but, since it affects the consumption and the CDD, it changes the framework in which technological choices are evaluated. For example, by climatically passing the balance point where high (B) or very high (C) insulation levels coupled with natural ventilation are more efficient than low insulation values (A).

## Conclusions

The proposed research introduces and calibrates two series of indicators which are able to represent local vulnerability to climate stresses (UHI and CC) by considering both a "virtual" building approach and a "real"

building approach (dynamic simulations). Differences in local heating and cooling degree-days due to CC and UHI conditions can be analysed using the proposed methodology to evaluate the quality and the resilience of a sustainable design process for both new and retrofitted buildings faced with climate variation risks in Mediterranean climate contexts. Results underline that the CDD index may be used in a protocol to evaluate the expected stress in building energy consumption and can be correlated to the effect of different technological choices.

Nevertheless, further analyses are under development to implement other climate-related parameters and to analyse the effect of a larger set of technological choices under CC and UHI conditions in a larger set of locations and building typologies.

The research was co-funded by the Italian grant 59\_ATEN\_RSG16CHG and by the Chilean project FONDECYT No. 11140578.



05 | (a) relazione tra l'indicatore climatico CDD e l'indicatore di edificio  $Q_{cool}$  per differenti temperature di riferimento ( $CDD_{26}$ ;  $CDD_{22.5}$ ;  $CDD_{18.3}$ ) caso Aa; (b) relazione tra il  $CDD_{18.3}$  e il  $Q_{cool}$  nei casi Ac, Bc e Cc sottoposti a cambiamenti climatici (blu-sopra) e nei casi Aa, Ba e Ca sotto l'effetto della UHI (giallo-sotto)

(a) relation between CDD climate-indicator and the  $Q_{cool}$  building-one for different base temperature ( $CDD_{26}$ ;  $CDD_{22.5}$ ;  $CDD_{18.3}$ ) for case Aa; (b) relation between  $CDD_{18.3}$  and  $Q_{cool}$  of cases Ac, Bc and Cc under the effect of Climate Changes (blue) and for cases Aa, Ba and Ca under the effect of UHI (yellow)

Chiesa, G. and Grosso, M. (2015b), "The influence of different hourly typical meteorological years on dynamic simulation of buildings", *Energy Procedia*, Vol. 78, pp. 2560-2565.

Chiesa, G., Simonetti, M. and Ballada, G. (2017), "Potential of attached sun-spaces in winter season comparing different technological choices in Central and Southern Europe", *Energy and Buildings*, Vol. 138, pp. 377-395.

Day, T. et al. (2006), *Degree-days: theory and application*, TM41:2006, CI-SBE, London.

IPCC (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland.

Kottek, M. et al (2006), "World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated", *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 15, No. 3, pp. 259-263.

Matteoli, L. and Pagani, R. (Eds.) (2010), *Cityfutures. Architecture Design Technology for the Future of the Cities*, Hoepli, Milano.

Meehl, G.A., et al. (2007), "Global Climate Projections", in Solomon, S. et al. (Eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 747-845.

Meteotest (2017), *Meteonorm handbook part I*, Meteotest, Bern.

Nakano, A., Bueno, B., Norford, L. and Reinhart, C. (2015). "Urban Weather Generator User Interface Development: New Workflow for Integrating Urban Heat Island Effect in Urban Design Process", *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate*.

Olgyay, V. (1963), *Design with climate*, Princeton University Press, Princeton.

Palme, M., Inostroza, L., Villacreses, G., Lobato-Cordero, A. and Carrasco, C. (2017), "From urban climate to energy consumption: enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect", *Energy and Buildings*, Vol. 145, pp. 107-120.

Palme, M., Carrasco, C. and Lobato, A. (2016). "Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Effect in Cities of Latin-American Pacific Coast", *Procedia Engineering*, No. 169, 199-206.

Santamouris, M. (2014), "On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings", *Energy and Buildings*, Vol. 82, pp. 100-113.

Santamouris, M. (Ed.) (2007), *Advances in passive cooling*, Earthscan, London.

Santamouris, M. and Asimakopoulou, D. (Eds.) (1996), *Passive Cooling of Buildings*, James & James, London.

Salvati, A. (2016), *The compact city in Mediterranean climate: heat island, urban morphology and sustainability*, Doctoral dissertation, Barcelona.

Salvati, A., Palme, M. and Inostroza, L. (2017), "Key Parameters for Urban Heat Island Assessment in A Mediterranean Context: A Sensitivity Analysis Using the Urban Weather Generator", *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, Vol. 245, No. 8.

Xuan, H. and Ford, B. (2012), "Climatic applicability of draught cooling in China", *Architectural Science Review*, Vol. 55, pp. 273-286.

